

# 주기적 충격하중을 받는 강 구조물의 구조건전성 평가

Evaluation Using Dynamic Characteristic of Steel Structures under Periodical Impact Loads

김 강 석<sup>1)</sup>      나 환 선<sup>2)</sup>      이 현 주<sup>3)</sup>      이 강 민<sup>4)\*</sup>      유 경 석<sup>5)</sup>  
Kim, Kang Seok      Nah, Hwan Seon      Lee, Hyeon Ju      Lee, Kang Min      Yoo, Kyung Seok

## Abstract

Recently, safety diagnosis of the existing structures has been emerged as important issue. In particular, systematical and precise safety diagnostics for steel structures for power substation, have been required. Steel structures for power substation are under the periodical impact loads from operations of gas insulated switchgear. These loading condition accelerates damage and aging of structure. The objective of this research is to evaluate damage of structure under periodical impact loads. To evaluate the integrity of structures as organizing mathematical models including the dynamic characteristics of structures, Frequency Domain Decomposition method was choiced and an algorism was proposed. For verifying this methods and algorism, a mathematical model is composed of the development of a variety of reverse analysis and a signal processing technology reflecting physical damage of structures. A series of analysis and test results indicatge that proposed method has a confidence for applying a filed test. Therefore, it is expected to be able to take advantage of system identification to detect damage for the maintenance and management of steel structures under periodical impact loads such as power substation.

**Keywords** : Steel structure, System identification, Power substation, Frequency domain decomposition

## 1. 서 론

강 구조물의 경우, 콘크리트에 비해 재료적 결함이 적고 구조적 안전성 문제가 제기된 사례가 적었기 때문에 유지관리에 대한 기준 및 기술 자료가 미흡하다. 변전소 강 구조물의 경우에도, 1998년 철골조로 최초 건설되어 2002년부터 표준화 설계가 진행된 이래, 현재까지 전국적으로 총 100 여개 이상 운영되고 있으나, 일상 및 정기 안전점검 수행시 대부분 육안조사에 의존하고 있다.

강재의 파괴는 극한 또는 항복강도 이하의 하중 반복에 의해서도 파괴되며, 이로 인한 손상이 발생하더라도 육안 발견이 어렵다. 변전소 구조물의 경우, 가스절연개폐기(Gas Insulation Switchgear, GIS)의 주기적 개폐에 의한 충격하중을 갖게 되고, 이로 인한 반복하중의 작용으로 인하여 구조물 손상 및 열화가 가속화될 수 있다. 게다가, 현장 관계자들은 변전소에서 발생하는 기기 충격하중

의 소음과 진동에 대한 정성적인 판단을 통해 향후 구조물의 건전성에 대해 심각한 영향을 미칠 것이라고 판단하고 있는 상황으로서, 운영 중인 변전소 구조물에 대한 합리적 건전성 평가방법이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 변전소 강 구조물의 건전성을 평가하기 위해 상시 발생하고 있는 기기 개폐로 유발된 충격하중에 대한 구조물의 건전성을 정량적으로 평가하고, 기기의 진동 특성을 활용하여 손상도를 추정할 수 있는 기법을 선정하고자 한다. 이를 위해 주기적인 기기 충격하중에 대한 구조물의 응답 특성을 분석하고 물리적 실제 시스템의 입력과 출력 데이터를 사용하여 그 구조물의 수학적 모델을 개선하는 시스템식별기법을 선정하여 손상평가를 수행하고자 한다. 이 기법은 시스템 모델 파라미터를 결정한 후에 동일한 입력 조건에서 시스템과 모델의 응답이 일치하는지를 판별할 기준함수의 결정을 하게 되며, 모델과 실제 시스템의 차이를 최소화 하도록 시스템 파라미터를 수정할 알고리즘

1) 정희원, 한전 전력연구원 선임연구원, 충남대학교 박사과정  
2) 정희원, 한전 전력연구원 책임연구원, 공학박사  
3) 정희원, 한전 전력연구원 선임연구원  
4) 정희원, 교신저자, 충남대학교 건축공학과 부교수, 공학박사  
5) 정희원, 충남대학교 건축공학과, 석사과정

\* Corresponding author : leekm@cnu.ac.kr 042-821-5625

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2011년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

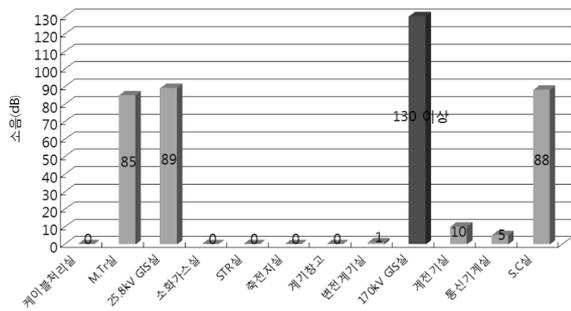


Fig. 1 Measurement of noise

을 선정하게 된다.

따라서, 현재 운영 중인 변전소를 대상으로 가스절연개폐기에 의한 동특성 계측과 구조해석 및 모의손상 실험을 실시하였다. 현장계측에서는 운영 중인 변전소 강 구조물의 구조 부재에 가속도계를 설치하여 가스절연개폐기에 의한 손상에 대한 장기 피로수명을 평가하였다. 또한, 본 연구에서는 주파수영역분해법(Frequency Domain Decomposition)을 통하여 고유진동수 및 모드형상에 대하여 손상평가를 하였고, 모의 해석 및 실험을 통한 검증은 별도로 수행하였다. 모의해석에서는 유한요소프로그램인 ANSYS를 이용하여 구조물의 고유진동수를 산정하였고, 실험에서는 계측된 가속도 응답을 근거로 주파수영역분해법을 활용하여 고유진동수를 비교하여 제안된 기법의 신뢰성을 검증하고, 구조물의 손상지수를 산정하였다.

## 2. 현장계측 및 해석을 통한 피로손상도 추정

변전소 강 구조물에 영향을 미치는 하중 및 설비기에서 발생하는 충격하중을 개략적으로 파악하고, 계측지점을 선정하는 것을 목적으로 운영 중인 변전소 구조물의 하중 특성을 조사하였다.

설비기기의 대부분은 외부에서 크레인으로 반출입되고 있고, 하중이 가장 큰 170kV GIS 기기의 경우, 부품으로 반입 되어 현장에서 조립 설치되고, 기타기기의 경우에도 기기 교체시 하중의 변화는 안전도 이내에 존재하는 것으로 나타났다. 변전소 강 구조물에서 발생하는 소음레벨은 대부분 기기 조작시 유발되고, 이 소음은 기기에 의해 발생한 진동에서 기인한 것으로 볼 수 있다. 기기 조작시 발생하는 소음 측정 결과는 Fig. 1과 같이 170kV GIS 기기에서 간이 소음계의 측정범위인 130dB을 초과하는 것으로 나타났다. 기기 조작에 따른 정상적인 진동을 파악하기 위해 실무자 대상으로 설문조사를 수행한 결

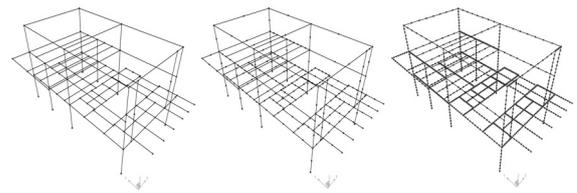


Fig. 2 Model-1

Fig. 3 Model-2

Fig. 4 Model-3

Table 1 Natural frequency

Mode Number	Model-1	Model-2	Model-3
1	0.018119	0.018072	0.018066
2	0.020188	0.020243	0.020252
3	0.022547	0.022533	0.022521
4	0.024111	0.024481	0.024499
5	0.032865	0.032315	0.03218
6	0.040715	0.040746	0.040706
7	0.049236	0.049042	0.04891
8	0.098695	0.096711	0.097208
9	0.14423	0.14116	0.14137
10	0.30515	0.25894	0.25911

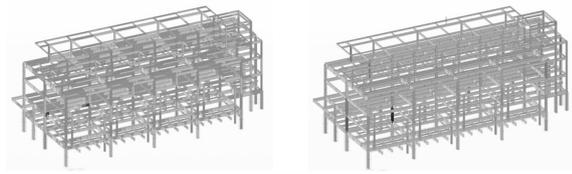
과에서도 최대 진동원이 170kV GIS 기기로 나타났다. 따라서, 해석 및 계측에서는 170kV GIS 기기 조작시 발생하는 충격하중에 대하여 중점적으로 수행하였다.

### 2.1 구조해석

구조 안정성 및 손상의 우려가 있는 부재를 사전 검토하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 국부진동에 대한 효율적인 검증을 위하여 요소 분할 정도에 따라 모델을 구성하여 모드형상을 추출하였다.

변전소 구조물 전체를 모형화하여 모드해석을 통한 동적 해석 결과, Fig. 2~4과 같이 Model 1은 보와 기둥의 연결 부분만을 점으로 구성하였고, Model 2는 보와 기둥을 2개의 요소로 분할하였다. Model 3은 해석의 정확성을 높이기 위하여 각 부재를 8개의 요소로 분할하였다.

위 3종류 모델의 저차 진동수를 비교한 결과, Table 1과 같이 저차 진동수의 경우, 값의 차이가 거의 없고, 고차모드의 경우, 요소를 세분화 할수록 진동수 값이 작아지는 것으로 나타났다. 실제로 기둥과 보를 2개 이상의 요소로 분할시 고차모드의 경우 근사값과 오차가 0.1%로 정밀해와 거의 수렴하였다. 따라서, 본 변전소 구조물을 해석하는데 있어서 Model-2 모델이면 충분하다는 판단 하에 170kV GIS 운전 시 발생하는 충격하중에 의한



(a) Y-axis (b) Z-axis  
Fig. 5 Stress under the shutting-down of GIS

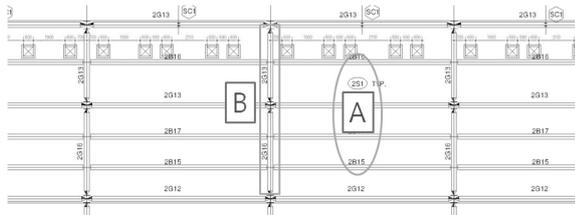


Fig. 6 Measurement point(B) and vibration source(A) at 170kV GIS room(2F)

구조물 안정성 검토를 실시하였다.

현장조사 및 설문조사 결과, 170kV GIS의 개폐시 발생되는 충격하중이 구조물의 손상에 많은 영향을 끼칠 것으로 나타났기 때문에 해석에서는 설계도서에서 적용되고 있는 개폐하중을 적용하여 해석을 수행하였다. 170kV GIS 개폐하중 적용시 변전소 구조물의 응력은 Fig. 5와 같다.

Fig. 5 (a)의 Y축 방향에 대하여 응력 검토결과, 170 kV GIS실 바닥과 상층 보에서 각각 -159.5 kN, 120.5 kN의 전단력이 집중되었고, Z축 방향에 대한 응력 검토 결과, 170kV GIS실과 하층 기둥에서 -636.8 kN, 650.7 kN의 상당히 큰 전단응력이 집중됨으로서 170kV GIS실 주변의 구조부재가 개폐기 진동하중에 취약하다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 실제 현장계측시 상기 부재들에 대한 집중적인 검토가 이루어져야함을 의미한다.

## 2.2 구조물 동특성 현장계측

구조해석 결과를 근거로 170kV GIS 기기의 충격하중이 구조물의 영향인자 중 가장 큰 것으로 선정하였다. 따라서, 발생하는 충격하중으로부터 야기되는 진동에 의한 가속도 응답을 측정하기 위해 보와 기둥 각각 단부와 중앙부 세 지점에 가속도계를 설치하여 진동이 끝날 때까지 계측하였다. Fig. 6은 2층 170kV GIS 실의 구조 도면으로 실제 계측위치는 설비기기가 위치한 A 지점에서 가장 가까운 B 지점으로서, 보와 기둥 부재를 대상으로 동일 위치에서 각 층별로 계측하였다.

계측결과, 170kV GIS기기의 하부 기둥 및 보에서 상

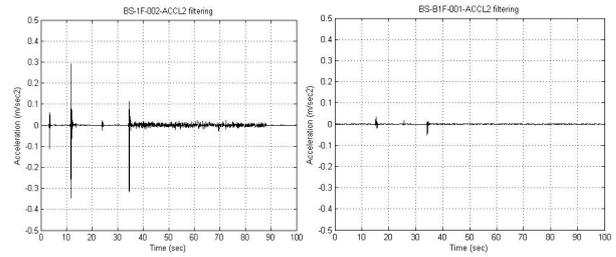


Fig. 7 Acceleration response of the center point at 1F(Left) and the end of the beam at B1F(Right)

Table 2 Strain of measurement point

Measurement point	Strain	
Center of a beam(B1F)	9.37E-02	-1.98E-03
End of a beam(B1F)	3.02E-02	-3.75E-03
End of a beam(1F)	5.03E-02	-3.72E-05
Top of a column(1F)	4.92E-02	-3.72E-05
End of a beam(2F)	5.03E-02	-3.72E-05
Bottom of a column(2F)	2.27E-03	-1.28E-02

대적으로 다른 계측지점에 비해 큰 가속도 응답이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 상기 부재들이 다른 부재들에 비해 상대적으로 큰 피로응력을 받을 수 있음을 의미하며, 기기 개폐하중을 적용한 구조해석 결과와 동일한 양상으로 나타났다. 1층과 지하 1층 보 중앙부의 가속도 응답결과는 Fig. 7과 같다.

## 2.3 피로손상도 추정

구조물에 작용하는 하중은 진폭과 함께 평균응력이 변하는 변동하중을 받는 경우가 많으므로 실제이력에 따른 피로 손상 거동을 묘사하여 피로수명을 정확히 예측하는 방법이 필요하다. 실제하중에서 일반적인 정보를 얻어 특정 구성요소의 피로수명을 결정하기 위해서는 복잡한 변동하중을 유용한 일정진폭 시험의 S-N 선도와 비교할 수 있는 몇 개의 단순화된 하중이력으로 줄이는 손상합산법이 필요하다. 따라서, 현재까지 제안된 방법 중 가장 많이 사용되는 낙수계수법(Rain flow counting)을 선정하여 변형율의 시간이력을 산정하였다. 각 계측점에서의 변형률은 측정된 가속도로부터 선형가속도법을 이용하여 적분하여 Table 2와 같이 변형률을 산정하였다. GIS 기기 하부, 1층 보 중앙부에서 계측된 결과로서 산정된 변형률의 시간이력은 Fig. 8과 같다.

계측점에서 발생하는 1초 동안의 변형율은 Fig. 9와 같이 모두 18개의 등가 변형률 폭으로 산정되고, 각각의 등

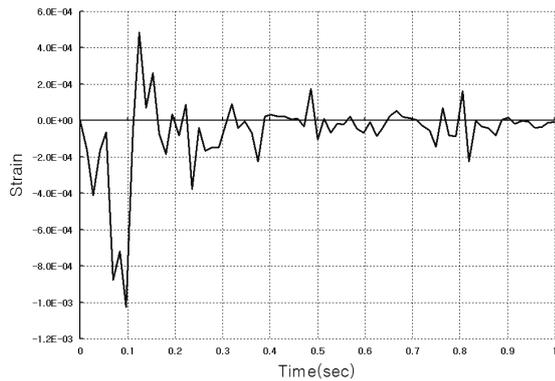


Fig. 8 Time-strain curve of a center of the beam under GIS for 1 Sec

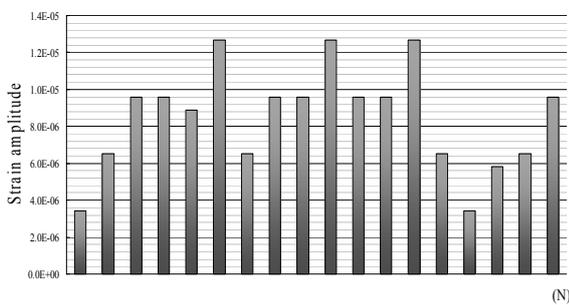


Fig. 9 Equivalent strain of a center of the beam under GIS

가 변형률 폭에 대하여 피로 수명(N)을 구할 수 있다. 기기 개폐로 유발된 충격하중에 의한 소성 변형이 없으므로 변형률은 식 (1)과 같다.

$$\Delta \varepsilon / 2 = \sigma'_f (2N)^b / E \quad (1)$$

여기서,  $\sigma'_f$ 는 피로응력계수, b는 피로응력지수로서, 재료의 물성치에 해당되는 값으로서, 식 (1)로부터 18개의 등가 변형률 폭에 대하여 피로수명을 구할 수 있다. 또한, 피로손상은 피로수명과 역수의 관계가 있으므로 최종적으로 구하고자 하는 누적 손상은 식 (2)에 의하여 구할 수 있다. 이러한 과정으로 구한 변형률의 시간이력에 의한 누적 손상도는 Table 3과 같다.

$$D^* = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{N_i} \right) \quad (2)$$

누적피로에 대한 피로손상도는 부재에 응력이 작용했을 때에 누적되는 피로손상의 정도이며 그 누적이 1.0이 되었을 때에 피로에 의한 손상을 초래한다고 판단한다.

Table 3 Accumulated damage of a measurement point

Measurement point	Time	Accumulated damage	
		1 year	30 years
지하 1층 좌측 기둥 하부	15.6	3.02403E-24	9.07208E-23
지하 1층 좌측 기둥 상부	15.5	5.88668E-29	1.766E-27
지하 1층 보 단부	15.6	2.39376E-27	7.18128E-26
1층 좌측 기둥 상부	15.1	1.59208E-21	4.77623E-20
1층 보 우측 단부	15.5	3.92423E-22	1.17727E-20
1층 우측 기둥 상부	15.5	4.59088E-18	1.37726E-16
2층 좌측 기둥 상부	15.5	7.5098E-16	2.25294E-14
2층 우측 기둥 상부	15.9	3.95096E-14	1.18529E-12

Table 4 Index for accumulated damage

누적 피로 손상도(D) 판별지표	판정 구분	안전 보안 등에 대한 영향
$D \geq 1.0$	A1	안전을 위협
$1.0 > D \geq 0.8$	A2	
$0.8 > D \geq 0.5$	B	장래 위협
$0.5 \geq D \geq 0.2$		
$D < 0.2$	S	영향 없음

이에 대하여 2009년 한국시설안전공단에서 발간한 안전 점검 및 정밀안전진단 세부지침 중 강 구조물 피로 설계 지침에서는 누적 피로손상도에 따른 건전도 판정 및 판정 지표를 Table 4와 같이 구분하고 있다.

위에서 언급한 바와 같이 축적 손상도의 값이 1이 되면 구조재의 피로 파괴를 의미한다. 현장 계측결과로 산정한 손상도를 Table 4를 기준으로 판단해보면, 변전소의 수명을 30년 정도로 예상하고 본다고 하더라도 모든 계측 지점에서 피로 손상도가 0.2보다 작으므로 170kV GIS 설비의 개폐로 유발된 피로에 대한 안전성은 확보할 수 있다고 판단된다.

그러나, 현장 여건 상, 계측된 구조물이 최근 완공된 것으로서, 구조 부재의 손상이 발생되지 않아 피로 손상도가 극히 작게 나타났지만, 준공 이후, 15년 넘게 운영 중인 변전소가 있는 점을 감안하여 노후화와 열화로 일부 부재 혹은 구조물 전반적인 강성 감소를 고려해야 한다. 따라서, 일부 요소에서 임의적으로 강성을 감소시킨 변전소 강 구조물과 유사한 축소모형에 대한 모의손상실험을 수행하여 구조물을 평가하는 기법을 제안하고자 한다.

### 3. 손상도 추정을 위한 주파수영역분해법 적용성 검토

현재 운영 중인 구조물에 직접적으로 임의적인 하중을 가할 수 없어 구조물에 상시 발생하고 있는 기기 진동 특성을 활용하고, 특정 지점에서 단위 충격하중을 발생시켜 측정된 가속도 응답을 기준으로 고유진동수 및 모드형상을 추출하고, 해석적 검증을 기준으로 본 연구에서 제안하는 기법의 타당성을 비교하고자 한다.

동적거동을 예측하기 위해서 전체구조물을 해석하는 방법은 매우 번거로울 수 있으며 실제로 복잡한 3차원 구조물의 경우 모델의 복잡함으로 인해 실제의 거동을 정확하게 예측하기는 상당히 어려운 일이 될 수 있기 때문에 모델의 단순화가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 3층 1경간 구조물로 단순화하여 모의해석을 수행하였다.

#### 3.1 주파수영역분해법의 선정 배경

구조계의 고유진동수와 모드형상은 구조계의 매개변수 즉 질량 및 강성의 함수이므로 구조계의 고유진동수와 모드형상의 차이로부터 손상상태를 알 수 있다. 이러한 개념에 따라 동적 거동특성을 이용하여 구조물의 손상을 평가하기 위한 여러 가지 방법들이 연구되고 있지만, 보편적으로 이용되고 신뢰도가 높은 시스템식별기법(System Identification)이다.

시스템식별기법은 시간영역에서의 방법과 주파수영역에서의 방법으로 구분된다. 시간영역에서의 방법은 구조계의 비선형 거동이나 비정상 거동특성을 추정하거나 주어진 시계열자료가 적은 경우에 더 유용하고 주파수영역에서의 방법은 선형 정상 거동을 측정할 경우에 보다 더 유용한 결과를 얻을 수 있다.

변전소 강 구조물의 손상지수 산정을 위해서는 구조물의 특성상 전체적인 관점에서의 모형화가 요구되고 적은 계측점을 선정하더라도 저차모드의 고유진동수를 파악할 수 있는 시스템식별 기법이 필요하다.

시간영역기법의 경우, 주파수영역기법에 비해 일관성이 떨어지고 모든 자유도에서 측정된 응답을 필요로 하므로 일반적으로 적용하기 힘들 뿐만 아니라 감쇠의 식별이 고려되지 않으므로 변전소 강 구조물의 손상지수 산정에 있어서 부적합하다. 반면, 주파수영역에서의 모드식별 기법은 시스템을 식별하는데 있어서 구조물에 매우 일반적

Table 5 Analysis model

해석모형	손상 유형
Type 1	건전 상태
Type 2	4번 보 부재 손상
Type 3	1번 기둥 부재 손상
Type 4	4번 보, 1번 기둥 부재 모두 손상

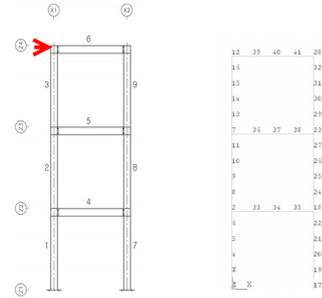


Fig. 10 Impact points and a test specimen

로 사용되어 왔고, 많은 양의 정보를 사용하는 대신 모드의 정보는 몇 개의 형상, 고유 주기, 모드의 감쇠비 등으로 표현이 가능하다.

변전소 기기 개폐 시 발생하는 충격에 의해 가진된 진동응답에는 외부 작업환경에 의한 잡음의 영향도 포함될 수 있으므로 보다 정확한 동특성 파악을 위해서 주파수영역영분해법(Frequency Domain Decomposition)을 사용한 평가기법으로 선정하였다. 또한, 운영 중인 변전소 강 구조물에서 진동 응답을 측정하기에는 현실적인 제약이 많다. 따라서 제한된 위치에서 측정한 자료만을 가지고 구조물의 모드정보에 대한 추정이 가능 여부를 평가하였으며, 유한요소해석을 통한 결과와 측정된 가속도 신호를 이용하여 구조물의 고유진동수와 모드형상을 추정하였다.

결과의 타당성을 입증하기 위하여 유한요소프로그램을 사용한 모의손상실험과 실제 실험을 통해 측정된 가속도를 활용하여 고유진동수 및 모드형상을 비교, 분석하였다.

#### 3.2 모의해석을 통한 동특성 추정

##### 3.2.1 해석모형 및 하중 가진방법

해석모형은 높이 4,500 mm, 경간 1,575 mm인 3층 1경간 구조물로서, Fig. 10과 같이 1번 기둥과 4번 보 부재가 각각 손상된 모형과 모두 손상된 모형, 그리고 건전 상태 모형 총 4종류로 구성하였다. 사용 강재는 SS400으로서, 건전 상태의 부재는 H-150×150×7×10 이고, 손상 부재는 단면을 축소하여 H-150×75×5×7을 사

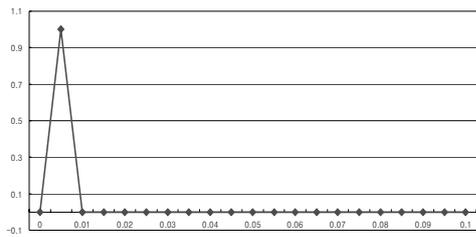


Fig. 11 Impact load data

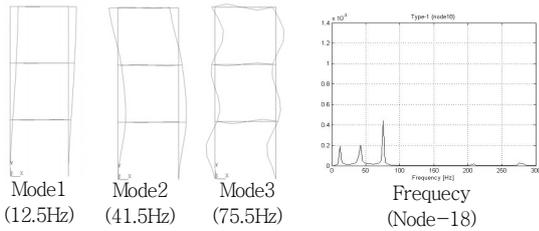


Fig. 12 Modal shape of Type 1, Natural Frequency and of Node-18

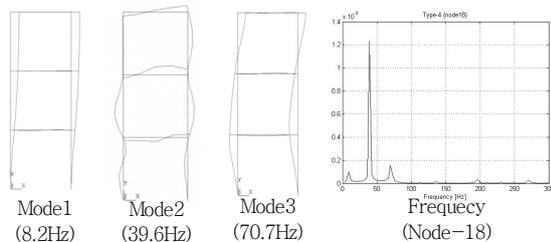


Fig. 13 Modal shape of Type 4, Natural Frequency and of Node-18

용했다. 하중의 가진은 구조물의 최상층에 수평방향으로 가력하였으며, 입력하중은 Fig. 11과 같고, 5%의 감쇠비를 적용하여 범용 유한요소해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 해석을 수행하였다.

### 3.2.2 해석결과

대표적으로 Type 1,4번의 1~3차 모드별 고유진동수와 형상을 Fig 12, 13에 나타냈다.

부재의 손상에 따라 확인한 모드형상의 변화가 Fig. 12와 13과 같이 확인되었으며, 절점에서의 주파수성분을 분석한 결과, 손상이 발생할수록 높은 주파수 성분과 변위가 크게 발생하였다. 모드해석 결과, Type 1~Type 4의 모형에 대한 모드별 고유진동수를 비교해보면 Fig. 14와 같이 손상된 모형의 고유진동수가 작게 나타났고, 3차 모드 이상의 고차 모드에서 그 차이가 더욱 컸다.

수치해석을 통하여 구한 주파수영역과 본 연구에서 제안한 주파수영역기법으로부터 구한 주파수영역을 비교함으로써 제안된 기법의 타당성을 검증하였다. 주파수영역분

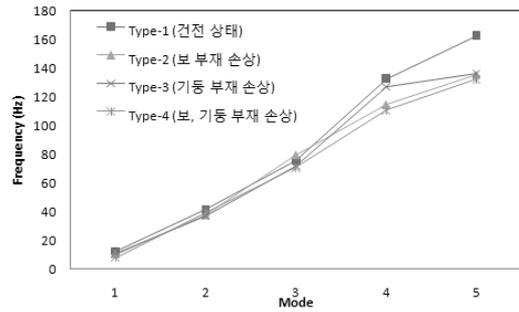


Fig. 14 Frequency under damage variables

Table 6 Comparison between FDD analysis and FEM results

모드	고유진동수 (Hz)							
	Type 1		Type 2		Type 3		Type 4	
	해석	FDD	해석	FDD	해석	FDD	해석	FDD
1	12.4	12.5	10.3	11.0	11.0	11.0	8.2	8.2
2	41.5	39.9	37.6	36.0	37.3	36.0	39.6	38.1
3	75.5	76.7	79.6	80.0	71.6	74.0	70.7	73.3

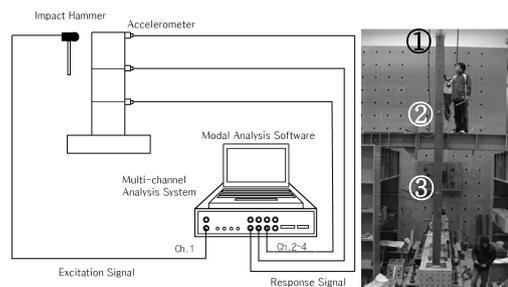


Fig. 15 Test composition and view

해법으로부터 구한 고유진동수와 유한요소해석 결과를 비교하면, Table 6과 같이 5% 이내의 오차 범위 내로 수렴하는 것으로 나타났다.

### 3.3 실험 검증

#### 3.3.1 실험방법

해석에 대한 검증을 위하여 해석모형과 동일한 구조물을 제작하여 충격하중을 가진하여 가속도를 계측하고 주파수영역분해법을 통하여 구조물의 고유진동수를 구하였다. 충격진동실험을 위한 실험체 및 계측 구성은 Fig. 15와 같다.

가속도계는 각 층에서 기둥 플랜지 면에 기둥의 주축과 직각방향으로 설치하였고, 가진 위치는 반대편 기둥 최상부에서 수평 방향으로 가력하였고 동시에 응답가속도 측정과정을 3회 반복하였다.

충격진동에 따른 각 층 바닥의 응답가속도는 현장 계측

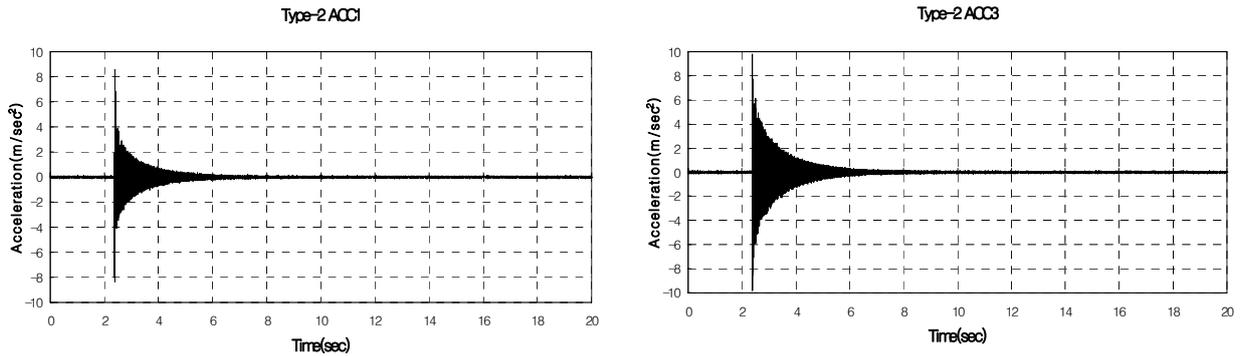


Fig. 16 Acceleration response of Type 2 specimen (Left : ①, Right : ③)

Table 7 FDD analysis results by the experiment

모드	고유진동수 (Hz)			
	Type 1 (건전상태)	Type 2 (보부재 손상)	Type 3 (기둥부재 손상)	Type 4 (보+기둥부재 손상)
1	11.3	9.8	9.9	6.3
2	35.8	37.4	36.8	25.2
3	71.6	72.2	73.7	55.1

실험에 사용한 것과 동일한 가속도계를 사용하여 측정하였고, 각 측정점의 발생응답을 1/360초 간격으로 총 21,601개를 샘플링하여 3회씩 측정된 평균값을 대상으로 분석하였다.

### 3.3.2 실험결과

모의해석으로 도출된 모드형상 및 고유진동수를 실험적으로 검증하기 위하여 Fig. 16과 같이 실험으로 계측된 가속도 응답을 기준으로 주파수영역분해법을 통하여 고유진동수 및 모드형상을 도출하였다.

충격 진동실험으로부터 획득한 데이터를 이용하여 주파수영역분해법을 적용하여 획득한 고유진동수는 Table 7과 같이 건전한 상태의 구조물에 충격가진 시 측정된 1차 고유진동수가 11.3 Hz, 보 손상 구조물의 경우 9.8 Hz, 기둥 손상 구조물의 경우 9.9 Hz, 그리고 보와 기둥 손상 구조물의 경우는 6.3 Hz로 나타나서, 구조물의 손상에 따른 강성 저하로 인하여 고유진동수의 변화가 1차 모드에서 두드러지게 낮아진다는 것을 확인할 수 있었다.

모의해석과 충격 진동실험 결과의 주파수영역분해법 적용한 결과의 비교는 Table 7과 같다. 손상이 없는 실험체인 Type 1 및 비교적 손상이 작은 Type 2와 Type 3 실험체의 고유진동수는 대부분 10% 내의 오차를 보이며 해석과 실험 결과의 오차가 비교적 작게 나타났지만, 구

조물에 보와 기둥 부재의 동시 손상을 가정한 Type 4 실험체의 경우, 해석과 실험결과의 오차가 30% 이상으로 나타났다. 이는 주파수영역분해법의 역해석을 통한 고유진동수의 산출과정이므로 강성의 차이가 심한 경우, 즉 손상이 큰 경우, 역해석에서 민감하게 반응하기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.4 손상지수 산정

현장 계측결과를 근거로 주파수영역분해법을 적용하면 구조물의 측정 가속도 응답에 대한 고유진동수를 추정할 수 있다. 또한, 구조물의 강성이 고유진동수의 제곱에 비례하기 때문에 식 (3)을 이용하여 대상 실험체 별 손상지수를 산정하면 Table 8과 같다. 여기서, 건전상태의 구조물의 손상지수를 1로 선정하여 1 이상은 손상이 발생하지 않은 것으로 판정하며, 1 미만의 경우 손상이 발생한 것으로 본다.

본 연구에서는 측정된 시간이력 데이터를 이용하여 고유진동수를 추정하고 이 고유진동수를 이용하여 다음과 같이 손상 지수를 산정한다.

$$D_F = \frac{\omega_D^2}{\omega_I^2} \approx \frac{K_D}{K_I} \geq 1 (O.K) \quad (3)$$

여기서,  $K_D$ 는 현재 상태(손상된 상태) 강성,  $K_I$ 은 건전한 상태 강성,  $\omega_D$ , 현재 상태(손상된 상태) 고유진동수,  $\omega_I$  : 건전한 상태 고유진동수이다.

산출된 손상지표에 대한 안전성 지표는 건축구조물에 대한 기준이 마련되어 있지 않은 실정이다. 그러나, 토목 구조물에 대해서는 손상평가 기준이 마련되어 있으며,

Table 8 Comparison of Natural frequency between FEM and experment

모델명	방법	고유진동수(Hz)	손상지수( $D_f$ )
Type 1	해석	12.450	1.000
	실험	11.250	1.000
Type 2	해석	10.959	0.775
	실험	9.837	0.765
Type 3	해석	10.950	0.774
	실험	9.887	0.772
Type 4	해석	8.200	0.434
	실험	6.291	0.313

Table 9에서와 같이 토목구조물에 대한 손상평가에 기준을 근거로 손상지수에 따른 건전도 평가 지표표를 제시한다. 이와 같이 설계도서 등을 활용하여 동적 해석을 통해 건전한 상태의 고유진동수를 산정하고, 현장계측을 통한 시간이력 데이터를 주파수영역분해법을 적용하여 손상된 부재의 고유진동수를 구하면 손상지수를 산출할 수 있다. 그러나 산출된 손상지표에 대한 안전성 지표로서 건축구조물에 대한 기준이 마련되어 있지 않은 실정이지만, 교량 등의 토목 구조물에 이용되는 손상평가 기준은 Table 9와 같다.

1차적인 건전성 평가로 본 연구를 통해 제안된 주파수영역분해법을 이용하여 현재 운영 중인 구조물의 고유진동수 및 모드형을 추출하여 손상지수를 선정하고, 2차적인 평가방법으로 기존 정밀안전진단에서 사용되는 국부적인 비파괴검사방법을 통하여 정확한 구조물의 건전성을 평가한다. 이러한 일련의 절차를 도식화하면 Fig. 17과 같다.

#### 4. 결론

구조건전성 평가기법에 관한 기존 연구자료를 토대로 주기적 충격하중을 받는 강 구조물의 동특성을 가장 합리적으로 추정할 수 있는 평가기법을 선정하고 이를 기초로 구조건전성 평가기법을 제안하였으며 모의해석 및 충격진동실험을 통하여 제안 기법의 신뢰성을 확인하고자 하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 유추할 수 있었다.

변전소 강 구조물의 설비기인 가스절연체폐기로 유발된 충격하중이 구조물에 초래하는 영향을 파악하기 위해 현장 계측을 통해 취득된 가속도 응답을 기준으로 낙수계수법을 이용한 피로 안정성 분석 결과, 누적 손상도가 매우 작은 값을 나타내고 있음을 확인하였다.

그러나, 일부 노후된 구조물을 고려하여, 변전소와 같이

Table 9 Assessment by damage index

손상지수 $D_f$	관정등급	조치
$0.75 \leq D_f$	B이상	현장에서는 문제는 거의 없고, 건전하다고 판단.
$0.75 > D_f \geq 0.5$	A	A2: 검사와 좌굴 등 손상의 진행성을 감시한다.
$0.5 > D_f$		A1: 상세한 검사를 하고, 대상을 고려한다.

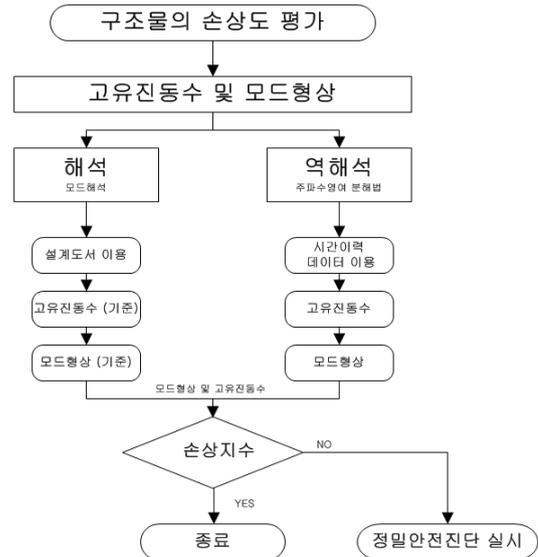


Fig. 17 Flow chart for damage assessment for steel structures under impact loads

주기적 충격하중을 갖는 강 구조물의 손상을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 주파수영역분해법을 선정하고 선정된 알고리즘의 신뢰성 분석을 위해 실험과 모의 해석으로 도출된 고유진동수 및 모드형상의 비교 결과, 10% 이내로 수렴하는 것으로 나타나서, 주파수영역분해법을 적용함으로써 예측이 가능하며 이를 근거로 구조물의 손상 여부를 판단할 수 있는 기술 자료로 사용이 가능한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 공민식, 가 훈, 손석호, 임성순, "진동모드를 이용한 사장교의 손상 검색", 한국구조물진단학회지 제10권 제6호, pp.113-122, 2006.
2. 김학수, 장동일, "손상지수를 이용한 단순보의 손상추정 이론 및 수치해석", 한국강구조학회 논문집, 8(4), 43-50, 1996.
3. 윤정방, 이형진, "System Identification 기법을 이용한 교량의 안전진단 방법", 대한토목학회지, 제45권, 제3호, 1997.
4. 전주현, 백석흠, 이경영, 조석수, 주원식, "운전하중하의 레인플로집계법을 이용한 화차 대차의 피로누적손상과 수명예측", 대한기계학회 춘추학술대회 논문집, pp.114-119, 2004

- 
5. 최영민, 미지의 입력하중과 제한된 응답계측값을 이용한 노후 구조물의 손상도 추정, 한양대학교 박사학위논문, 1998.
  6. 최 혁, 이규원, “고유진동수의 감소율과 신경망을 이용한 보의 손상평가”, 한국구조물진단학회지 제10권 제2호, pp.153-164, 2006.

7. Robert W. Soutas-Little, A MATLAB Manual for Engineering Mechanics: Dynamics-Computational Edition, 2007.

(접수일자 : 2010년 7월 8일)  
(심사완료일자 : 2010년 9월 10일)

---

## 요 지

변전소 구조물은 가스절연개폐기의 개폐로 유발되는 주기적인 충격하중을 받게 된다. 이러한 주기적인 충격하중은 구조물의 노후화 및 열화를 가속화하여 구조물의 일부 부재 혹은 전반적인 강성 감소를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 주기적인 충격하중이 구조물에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 손상 정도를 평가하는 방법을 선정하고자 한다. 따라서, 개략적인 손상 정도를 파악할 수 있는 효율적인 방법으로 인지되고 있는 시스템식별기법을 선정하였다. 선정된 기법에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 3층 1경간 축소 모형을 대상으로 모의 손상실험 및 해석을 통해 모드형상 및 고유진동수를 산정하고 결과를 비교하였다.

**핵심 용어** : 강 구조물, 시스템식별기법, 변전소, 주파수영역분해법

---